cap. 4 - GERADORES DE VAPOR

1 - Introdução

Vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial. Inúmeras razões colaboraram para a geração de energia através do vapor. A água é o composto mais abundante da Terra e portanto de fácil obtenção e baixo custo. Na forma de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. As relações temperatura e pressão de saturação permitem utilização como fonte de calor a temperaturas médias e de larga utilização industrial com pressões de trabalho perfeitamente toleráveis pela tecnologia disponível, já há muito tempo.

Grande parte da geração de energia elétrica do hemisfério norte utiliza vapor de água como fluído de trabalho em ciclos termodinâmicos, transformando a energia química de combustíveis fósseis ou nucleares em energia mecânica, e em seguida, energia elétrica.

Toda indústria de processo químico tem vapor como principal fonte de aquecimento: reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo outros setores industriais, como metalúrgico, metal-mecânico, eletrônica, etc., podem-se utilizar de vapor como fonte de aquecimentos de diversos processos.

Vapor saturado tem a grande vantagem de manter temperatura constante durante a condensação a pressão constante. A pressão de condensação do vapor saturado controla indiretamente a temperatura dos processos. O controle de pressão, por ser um controle mecânico de ação direta é conseguido muito mais fàcilmente que o controle direto de temperatura.

A faixa de temperaturas até 170 ºC utiliza vapor saturado até 10 kgf/cm^2 , cuja temperatura de saturação é 183 ºC. Nesta faixa está a grande maioria de pequenos e médios consumidores de vapor. Maiores temperaturas são possíveis a custa do aumento da pressão de saturação, o que implica num maior custo de investimento devido a necessidade de aumento da resistência mecânica e requisitos de fabricação e inspeção do gerador de vapor. O limite da temperatura de vapor saturado é o ponto crítico, a 374 ºC e 218 atmosferas. Não é vantajoso utilizar-se vapor superaquecido para processos de aquecimento a temperaturas mais altas, já que perderíamos a facilidade de controle de temperatura e diminuiríamos drasticamente a disponibilidade de energia por unidade de massa ou volume de vapor. Vapor superaquecido é utilizado e produzido para geração de energia elétrica ou mecânica em ciclos termodinâmicos, e neste caso a limitação de temperaturas de trabalho fica por conta dos materiais de construção empregados. Em utilização industrial, poderíamos arbitrar uma classificação de geradores de vapor em relação a pressão de trabalho:

- baixa pressão: até 10 kgf/cm^2
- média pressão: de 11 a 40 kgf/cm^2
- alta pressão: maior que 40 kgf/cm^2

Repetindo que esta classificação é arbitrária, porém representativa da faixa de utilização de vapor na indústria. Grandes caldeiras, as quais são utilizadas tanto para geração própria de energia elétrica quanto para processos de aquecimento, estão limitadas a pressões da ordem de 100 kgf/cm^2 . Existem caldeiras de maiores pressões, mas utilizadas

somente em grandes centrais termoelétricas ou grandes complexos industriais, representando um número muito reduzido de unidades, em comparação com as milhares de pequenas caldeiras em operação.

2 - Desenvolvimento das Caldeiras

As primeiras aplicações práticas ou de caráter industrial de vapor surgiram por volta do século 17. O inglês Thomas Savery patenteou em 1698 um sistema de bombeamento de água utilizando vapor como força motriz. Em 1711, Newcomen desenvolveu outro equipamento com a mesma finalidade, aproveitando idéias de Denis Papin, um inventor francês. A caldeira de Newcomen era apenas um reservatório esférico, com aquecimento direto no fundo, também conhecida como caldeira de Haycock (figura 1).

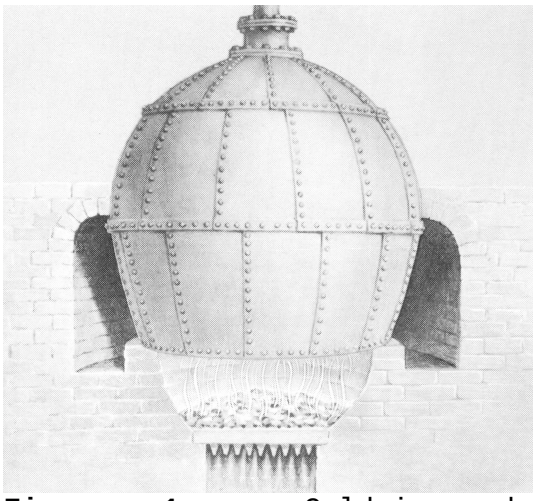

Figura 1 - Caldeira de Haycock, 1720

James Watt modificou um pouco o formato em 1769, desenhando a caldeira Vagão (figura 2), a precursora das caldeiras utilizadas em locomotivas a vapor. Apesar do grande desenvolvimento que Watt trouxe a utilização do vapor como força motriz, não acrescentou muito ao projeto de caldeiras.

Todos estes modelos provocaram desastrosas explosões, devido a utilização de fogo direto e ao grande acúmulo de vapor no recipiente. A ruptura do vaso causava grande liberação de energia na forma de expansão do vapor contido.

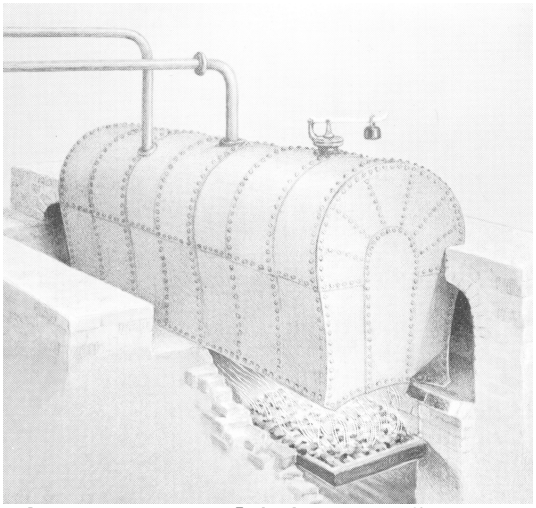

Figura 2 - Caldeira Vagão, de James Watt, 1769

Nos finais do século 18 e início do século 19 houveram os primeiros desenvolvimentos da caldeira com tubos de água. O modelo de John Stevens (figura 3) movimentou um barco a vapor no Rio Hudson. Stephen Wilcox, em 1856, projetou um gerador de vapor com tubos inclinados, e da associação com George Babcock tais caldeiras passaram a ser produzidas, com grande sucesso comercial (figura 4).

Em 1880, Alan Stirling desenvolveu uma caldeira de tubos curvados, cuja concepção básica é ainda hoje utilizada nas grandes caldeiras de tubos de água (figura 5).

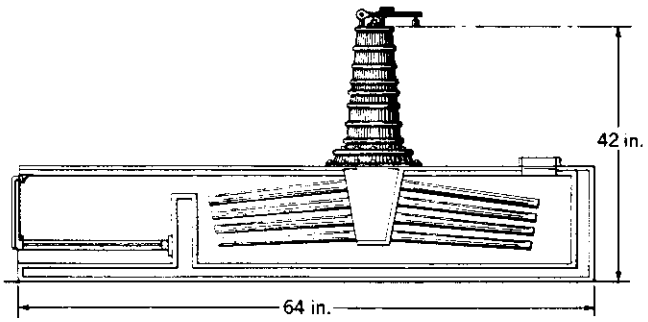

Figura 3 - Caldeira de tubos de água, 1803.

Nesta época, tais caldeiras já estavam sendo utilizadas para geração de energia elétrica. A partir do início deste século o desenvolvimento técnico dos geradores de vapor se deu principalmente no aumento das pressões e temperaturas de trabalho, e no rendimento térmico, com utilização dos mais diversos combustíveis. A aplicação a propulsão marítima alavancou o desenvolvimento de equipamentos mais compactos e eficientes.

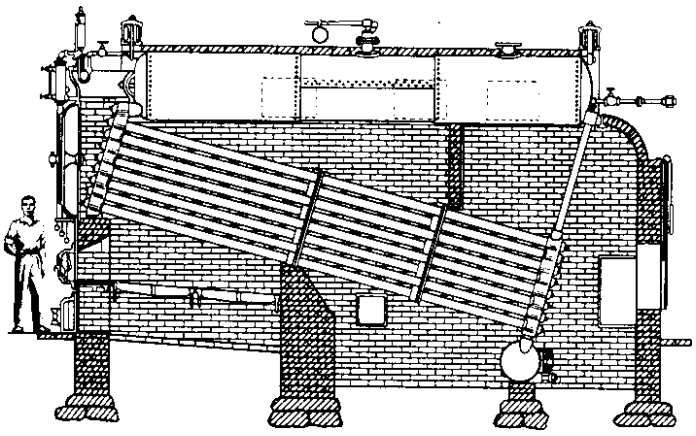

Figura 4 - Caldeira de tubos retos,Babcock e Wilcox, 1877.

3 - Tipos de Caldeiras

Atualmente, podemos classificar as caldeiras em dois tipos básicos:

- flamotubulares, onde os gases de combustão circulam por dentro de tubos, vaporizando a água que fica por fora dos mesmos e

- aquatubulares, onde os gases circulam por fora dos tubos, e a vaporização da água se dá dentro dos mesmos.

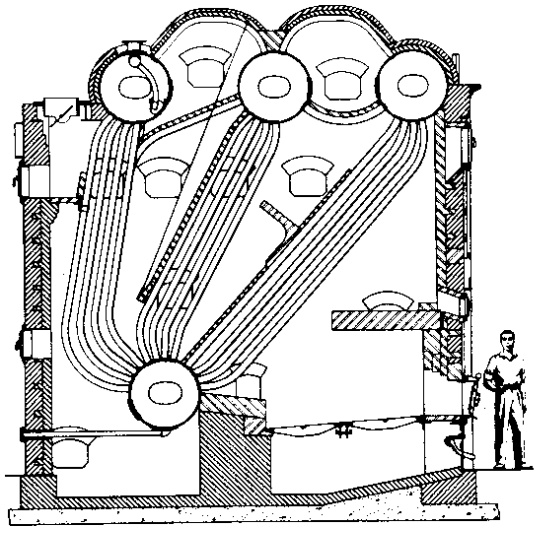

Figura 5 - Caldeira de tubos curvados, Stirling, 1880.

3.1. Caldeiras flamotubulares:

Constituem-se da grande maioria das caldeiras, utilizada para pequenas capacidades de produção de vapor (da ordem de até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar), chegando algumas vezes a 15 ou 20 bar.

As caldeiras flamotubulares horizontais constituem-se de um vaso de pressão cilíndrico horizontal, com dois tampos planos (os espelhos) onde estão afixados os tubos e a fornalha. Caldeiras modernas tem diversos passes de

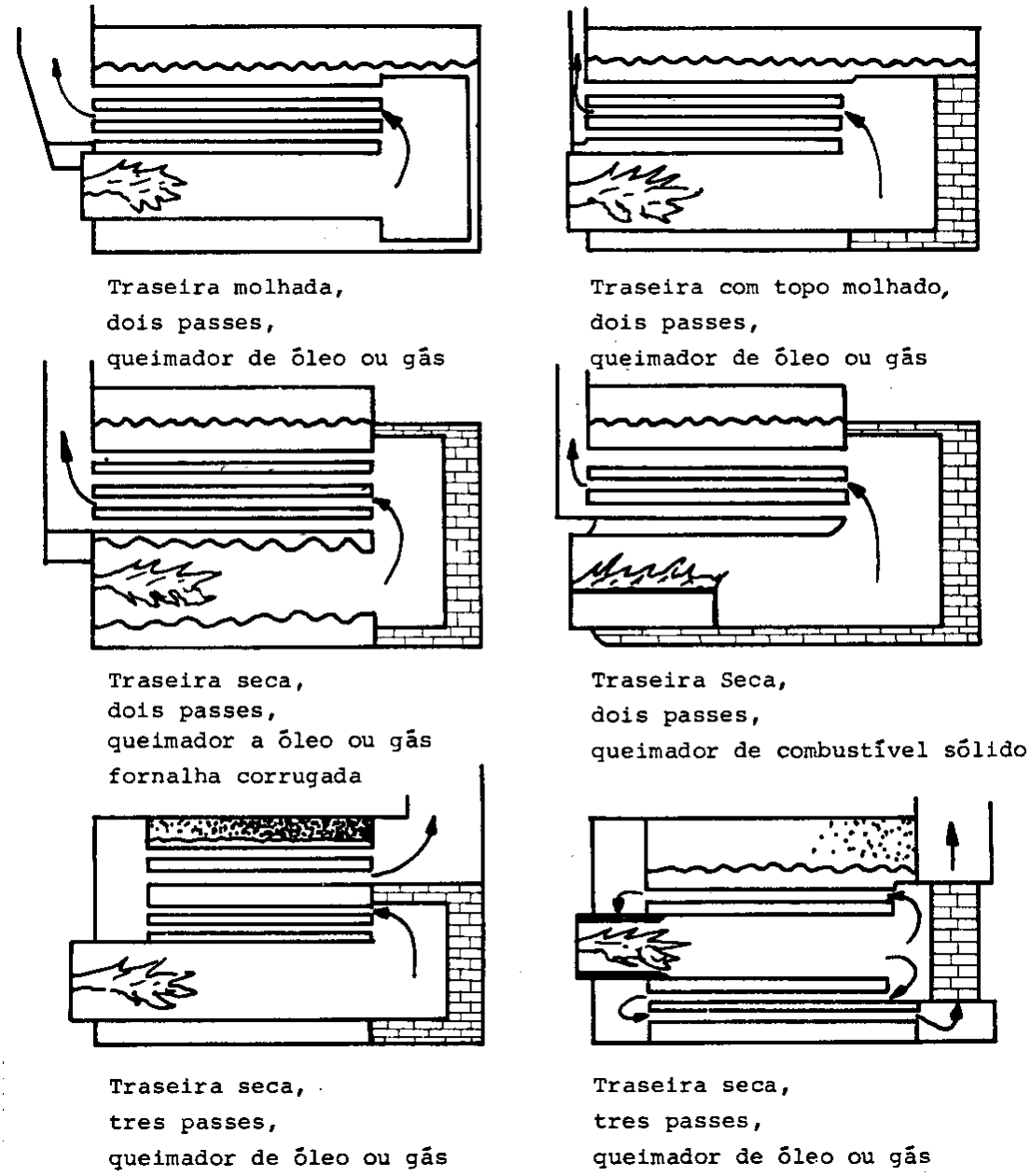

Figura 6 - Tipos de caldeiras flamotubulares

gases, sendo mais comum uma fornalha e dois passes de gases (figura .6). A saída da fornalha é chamada câmara de reversão e pode ser revestida completamente de refratários ou constituída de paredes metálicas molhadas.

Câmara de reversão molhada produz melhores rendimentos térmicos pela diminuição de perdas de calor ao ambiente, porém são mais complicadas construtivamente e consequentemente mais caras.

As fornalhas das caldeiras flamotubulares devem ser dimensionadas para que a combustão ocorra completamente no seu interior, para não haver reversão de chama que vá atingir diretamente os espelhos, diminuindo a vida útil da caldeira. A fornalha também se constitui de um corpo cilíndrico e está completamente imersa em água. Pela sua própria concepção, caldeiras flamotubulares modernas só queimam combustíveis

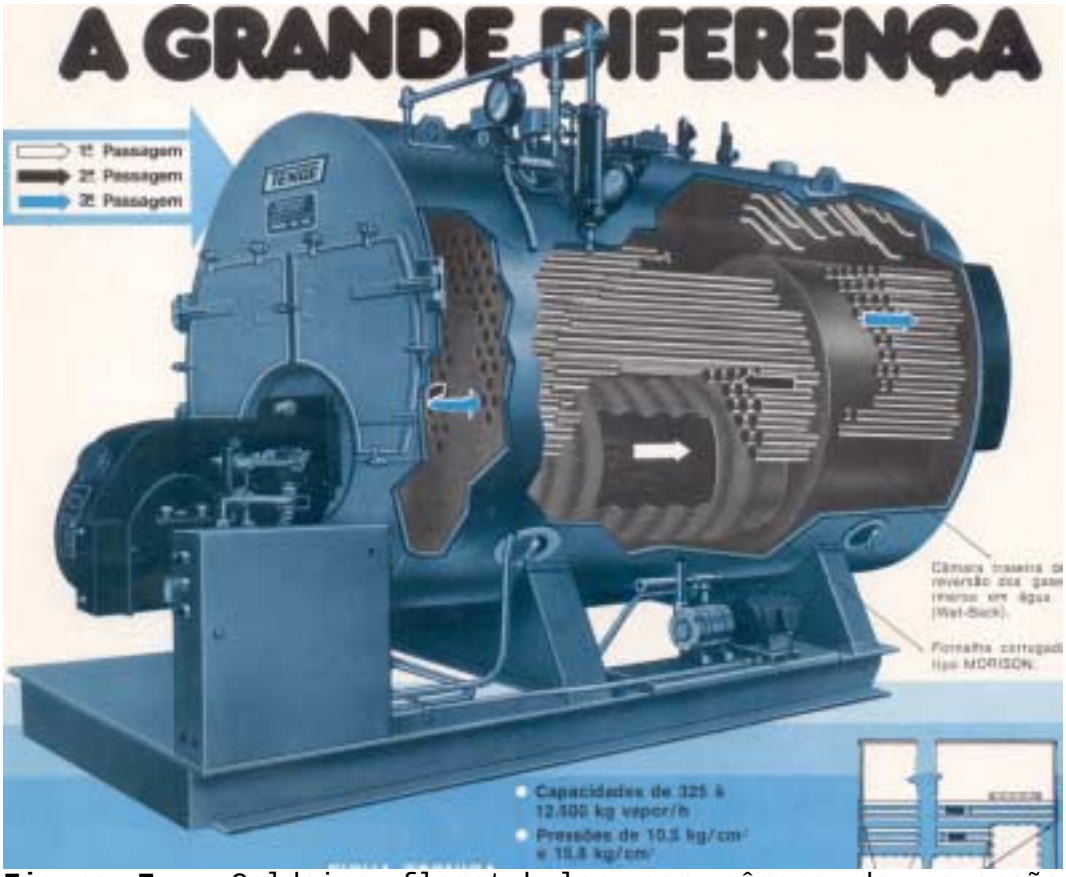

Figura 7 - Caldeira flamotubular com câmara de reversão molhada e fornalha corrugada.

líquidos ou gasosos, devido a dificuldade de se instalar grelhas para combustíveis sólidos. Algumas caldeiras flamotubulares de pequena capacidade queimam combustíveis sólidos através de adaptação de grelhas na fornalha, porém são limitadas ao tamanho necessário da área de grelha. Para queima de combustíveis sólidos em caldeiras de pequena capacidade utiliza-se as caldeiras mistas, que serão tratadas mais adiante.

Desde as primeiras caldeiras do século 17, até os modelos atuais, as caldeiras flamotubulares passaram por sucessivos desenvolvimentos até a atual concepção de uma fornalha e mais dois passes de gases de combustão. A grande aceitação deste tipo para pequenas capacidades está associada principalmente no seu baixo custo de construção, em comparação com uma aquatubular de mesma capacidade. Por outro lado, o grande volume de água que acondiciona limita, por questões de segurança, as pressões de trabalho e a qualidade do vapor na condição de vapor saturado. A figura 7 mostra uma caldeira flamotubular moderna, com câmara de reversão molhada e fornalha corrugada.

A água acumulada no corpo da caldeira pode funcionar como um pulmão de vapor, respondendo a súbitas flutuações de demanda com pouca queda de pressão da rede de vapor, sendo adequada portanto para aplicações onde o consumo é variável.

A eficiência térmica destas caldeiras está na faixa de 80 a 90%, sendo dificil se atingir maiores valores pela dificuldade de se acrescentar equipamentos adicionais de recuperação de calor.

3.2 - Caldeiras aquatubulares:

As caldeiras aquatubulares tem a produção de vapor dentro de tubos que interligam 2 ou mais reservatórios cilíndricos horizontais, conforme figura 8:

- o tubulão superior, onde se dá a separação da fase líquida e do vapor, e
- o tubulão inferior, onde é feita a decantação e purga dos sólidos em suspensão.

Os tubos podem ser retos ou curvados. As primeiras caldeiras aquatubulares utilizavam tubos retos, solução hoje completamente abandonada, apesar de algumas vantagens, como a facilidade de limpeza interna dos tubos.

A caldeira de tubos curvados, interligando os balões, proporcionam arranjo e projeto de câmaras de combustão completamente fechada por paredes de água, com capacidades praticamente ilimitadas. Dada a maior complexidade construtiva em relação às caldeiras flamotubulares, as aquatubulares são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, exatamente onde o custo de fabricação do outro tipo começa a aumentar desproporcionadamente.

Em relação ao modo de transferência de calor no interior de caldeira existem normalmente duas secções:

- a secção de radiação, onde a troca de calor se dá por radiaçãodireta da chama aos tubos de água, os quais geralmentedelimitam a câmara de combustão.
- a secção de convecção, onde a troca de calor se dá por convecção forçada, dos gases quentes que sairam da câmara de combustão atravessando um banco de tubos de água.

Nao há limite físico para capacidades. Encontram-se hoje caldeiras que produzem até 750 t/h de vapor com pressões até 3450 atm.

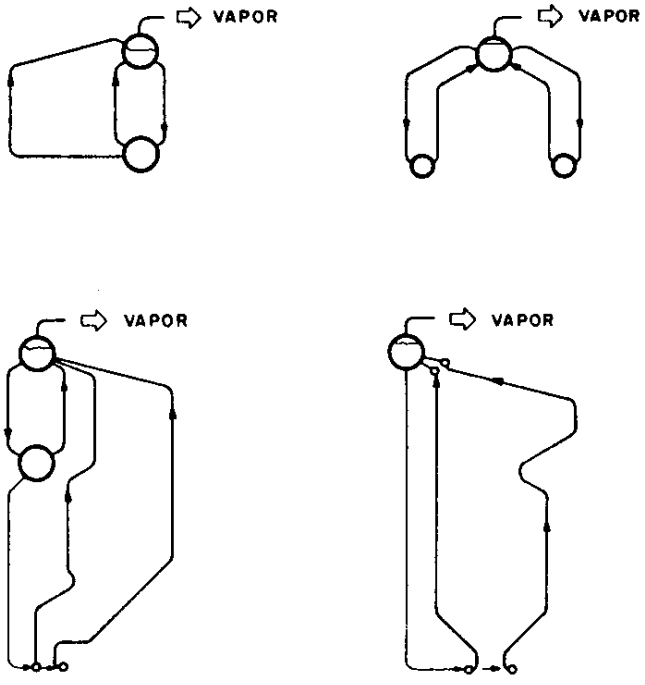

Figura 8 - Esquemas construtivos de caldeiras aquatubulares, com circulação natural.

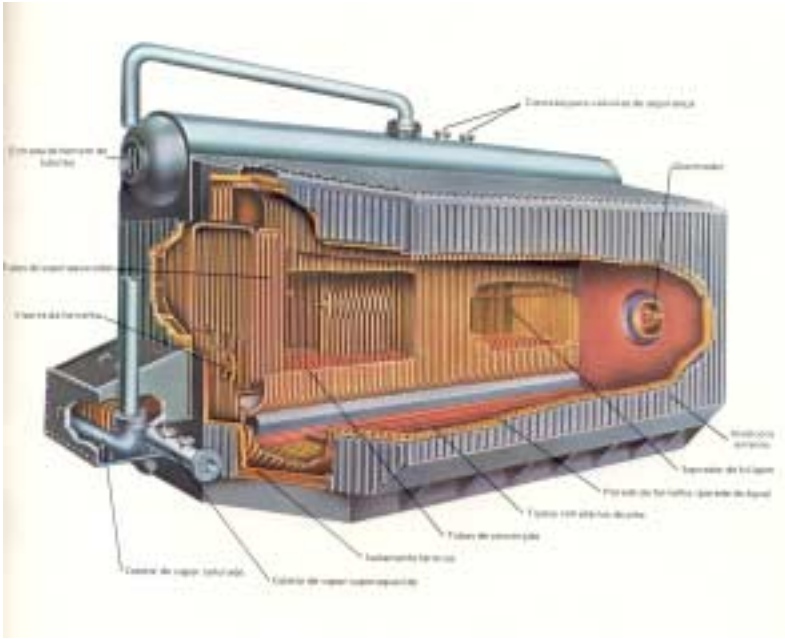

Figura 9 - Caldeira aquatubular compacta

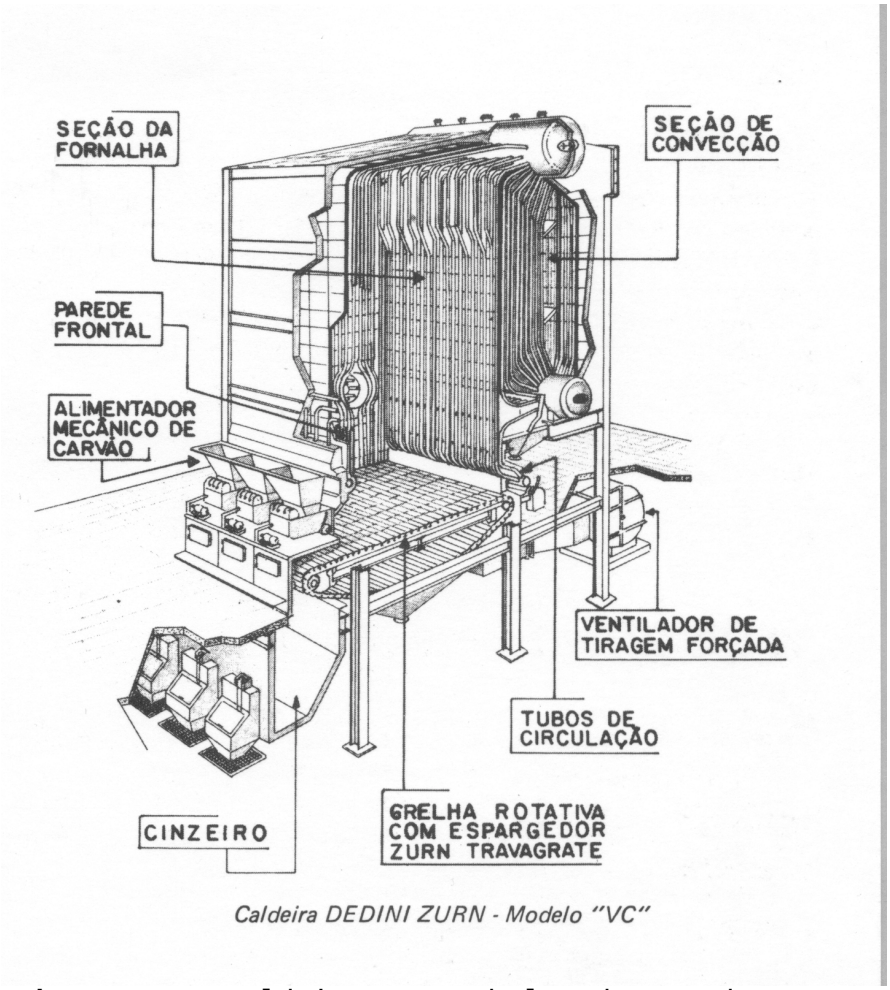

Figura 10 - Caldeira aquatubular de grande porte.

Para aplicação industrial, as capacidades variam da ordem de 15 a 150 t/h, com pressões até 90-100 bar.

As figuras 9 e 10 mostram uma caldeira aquatubular compacta e uma caldeira de alta produção de vapor.

Circulação da água

A água pode circular por convecção natural pelos tubos, devido a diferença de densidade entre o líquido e vapor formado pelo aquecimento conforme esquematizado na figura 11. A figura 12 mostra um gráfico que nos fornece a relação entre os pesos específicos do líquido e vapor saturado em função da pressão de saturação. A força motriz da circulação de água é exatamente a diferença de pêso específico.

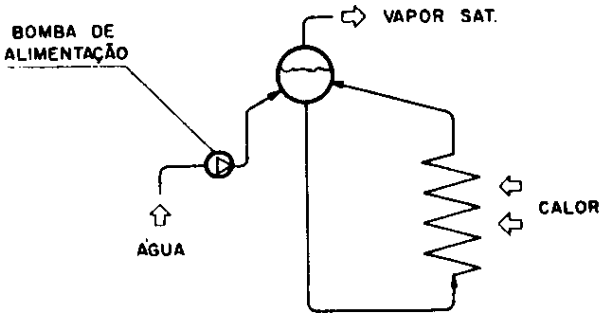

Figura 11 - Esquema da circulação natural

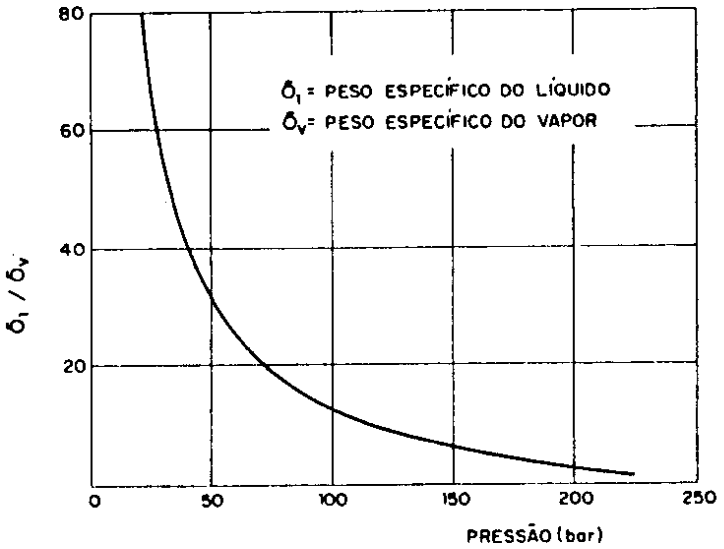

Figura 12 - Relação entre os pesos específicos da água líquida e vapor saturado, em função da pressão de saturação

Caldeiras de pressão próxima ao ponto crítico (218 atm), ou maior, necessitam de circulação assistida , devido a pouca diferença entre as densidades de líquido e vapor. Um esquema da circulação de caldeira deste tipo esta mostrado na figura 13.

Câmara de combustão.

As paredes de água da câmara de combustão podem ser totalmente integrais, ou seja, cada tubo tangente ao próximo formando uma parede impermeável aos gases, ou ainda podem ser construídas com tubos interligados por aletas de chapa soldadas. Há ainda paredes de água com tubos espaçados e parede refratária. O calor que não atinge diretamente os tubos é reirradiado pelo revestimento refratário (figura 14).

3.3 - Caldeiras mistas

A necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade fez surgir uma solução híbrida que são as caldeiras mistas. Basicamente são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos através de grelhas de diversos tipos possibilitando assim o espaço necessário para os maiores volumes da câmara de combustão necessários a combustão de sólidos, principalmente em grandes tamanhos, tais como lenha em toras, cavacos, etc, além da possibilidade de retirada de cinzas por baixo das grelhas (o cinzeiro). As caldeiras mistas não reumem todas as vantagens da aquatubular, como a segurança, maior eficiência térmica, etc., porém, é uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustível sólido a baixo custo. Tem ainda a possibilidade de queimar combustível líquido ou gasoso, com a instalação de queimadores apropriados.

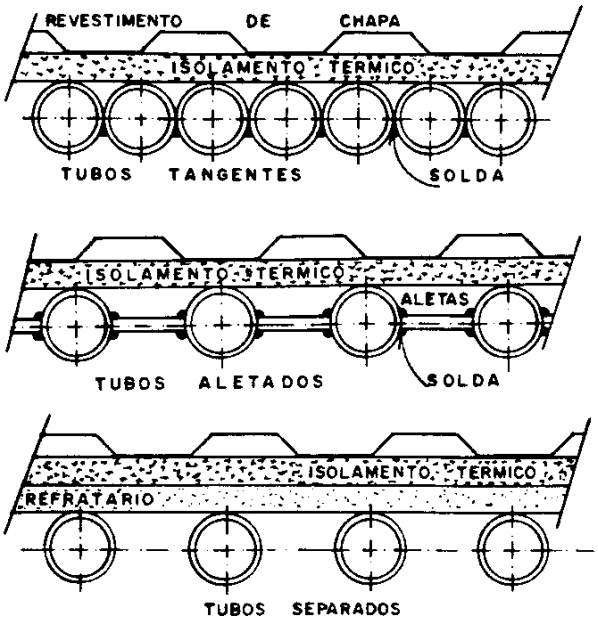

Figura 14 - Tipos de paredes de água para fornalhas de caldeiras aquatubulares.

O rendimento térmico destas caldeiras são menores que as

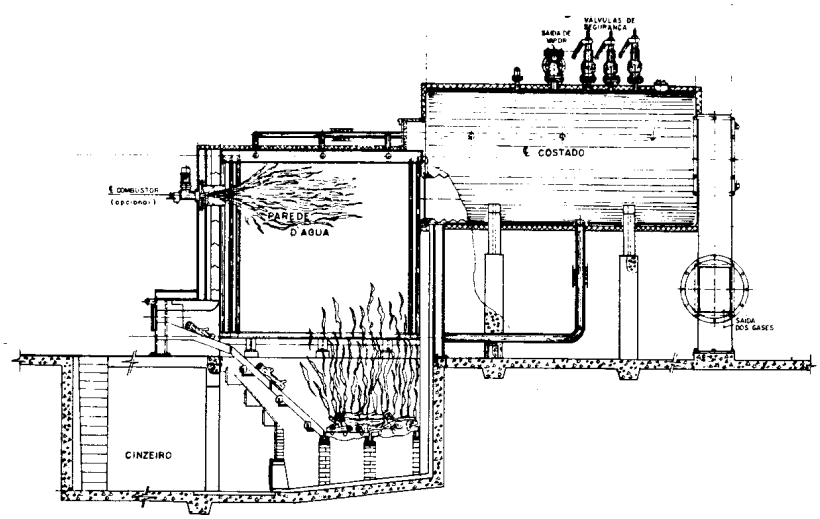

Figura 15 - Caldeira flamotubular com ante-fornalha de paredes de água.

flamotubulares, devido a perda de calor pela antecâmara. Dificilmente as paredes frontais e traseira são revestidas de tubos, devido a dificuldade construtiva pelo pequeno tamanho da caldeira (figura 15).

3.4 - Caldeiras de recuperação de calor

Alguns processos de fabricação geram gases de processo ou de combustão com temperatura alta o suficiente para se recuperar calor destes. Como exemplo, gases de alto forno ou gases de processos de fabricação de amônia, ou produtos de combustão de incineradores e fornos de alta temperatura (figura 16). Neste caso, a caldeira pode ser tanto aquatubular como flamotubular, valendo ainda a escolha pela capacidade de produção de vapor, optando-se pela aquatubular para maiores capacidades.

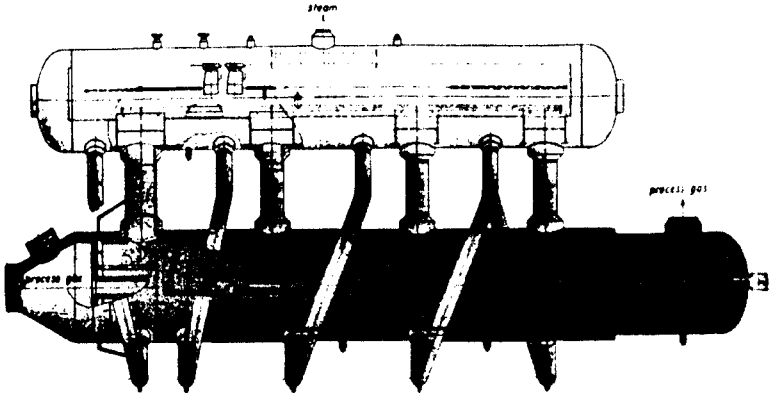

Figura 16 - Caldeira de recuperação de calor de gases de processo

4 - Componentes principais de caldeiras

Caldeiras flamotubulares são geralmente equipamentos montados em base única e poucos acessórios além dos necessários são acrescentados.

Grandes geradores de vapor podem possuir mais componentes além dos que já foram citados.

Os principais componentes são: (figura 17)

a) cinzeiro: em caldeiras de combustíveis sólidos, é o local onde se depositam as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado.

b) fornalha com grelha ou queimadores de óleo ou gás.

c) seção de irradiação: são as paredes da câmara de combustão revestidas internamente por tubos de água.

d) seção de convecção: feixe de tubos de água, recebendo calor por convecção forçada; pode ter um ou mais passagens de gases.

e) superaquecedor: trocador de calor que aquecendo o vapor saturado transforma-o em vapor superaquecido.

f) economizador: trocador de calor que através do calor sensivel dos gases de combustão saindo da caldeira aquecem a água de alimentação.

g) pré-aquecedor de ar: trocador de calor que aquece o ar de combustão também trocando calor com os gases de exaustão da caldeira.

h) exaustor: faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido a circulação dos gases.

i) chaminé: lança os gases de combustão ao meio ambiente, geralmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos.

A caldeira pode ainda ter equipamentos de limpeza dos gases, tais como filtros, ciclones ou precipitadores eletrostáticos para captação de material particulado ou ainda lavadores de gases para captação de gases ácidos: SOx,NOx, etc...

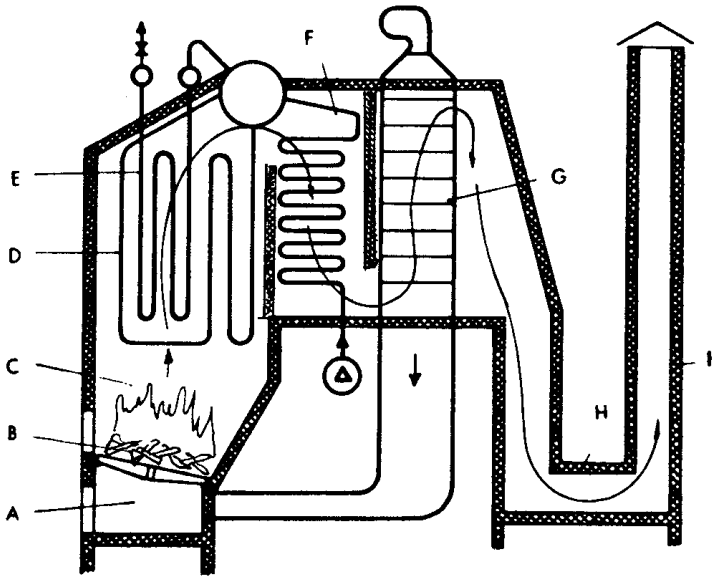

Figura 16 - Componentes principais de um gerador de vapor.

4.1 - Superaquecedores:

Vapor saturado é extraído do tubulão superior e entra em um trocador de calor instalado dentro da própria caldeira. Os superaquecedores podem ser de natureza apenas convectiva, ou seja, recebe calor somente por convecção térmica, ou de irradiação, e neste caso, estão localizados dentro da própria câmara de combustão, ou na saída desta, de maneira que receba calor por radiação da chama ou da grelha. A temperatura de superaquecimento varia com a carga da caldeira, já que a troca de calor não é acompanhada de mudança de fase como na vaporização. A troca de calor dentro do superaquecedor é função da velocidade do vapor dentro dos tubos e da velocidade dos gases na zona de convecção. A figura 17 mostra o comportamento da temperatura de superaquecimento do vapor conforme a carga da caldeira e o tipo de trocador. Equipamentos de convecção aumentam a temperatura de superaquecimento com o aumento da carga da caldeira, pois os coeficientes de troca de calor tendem a aumentar com as maiores velocidades dos gases e também do vapor dentro dos tubos. Superaquecedores de irradiação tem a temperatura de saída diminuida com o aumento da produção de vapor. A irradiação de calor varia pouco com a carga de produção de vapor . Em baixa carga a velocidade do vapor é mais baixa e consequentemente os coeficientes de transferência de calor também.

Para manter a temperatura de saída do superaquecedor constante, projetaram-se unidades mistas com secções de radiação e convecção.

O controle fino da temperatura de superaquecimento pode ser feito de diversas maneiras:

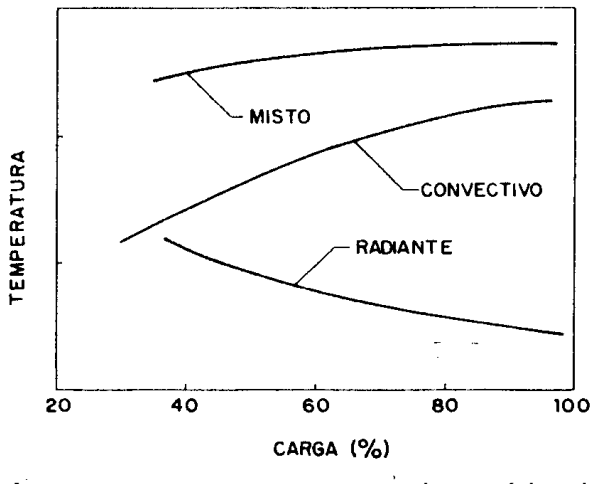

Figura 17 - Temperatura de saída de superaquecedores em função da carga da caldeira.

- contrôle da taxa de radiação, através do contrôle da posição angular dos queimadores de óleo ou gás, direcionando a chama radiante ao superaquecedor, ou contrôle da capacidade de combustão dos queimadores mais próximos ao superaquecedor.

- desvio de gases passando pelo superaquecedor, através de uma válvula de desvio regulavel automáticamente.

- utilização de dessuperaquecedor (ou atemperador), na saída do superquecedor, o qual através da injeção direta de água líquida controla a temperatura de saída do vapor superaquecido. Neste caso o superquecedor tem que ser projetado para temperatura de saída maior que o necessário, a fim de permitir margem de contrôle. A temperatura de saída do atemperador é então controlada pela vazão de água injetada. Um esquema do atemperador é mostrado na figura 18.

O atemperador é atualmente o método mais utilizado, pois proporciona ótimo contrôle e rápida resposta com a variação da carga, e independe do tipo de superaquecedor, seja de radiação, de convecção ou misto.

Variações nos detalhes construtivos de superaquecedores são diversas, e se referem ao número de passes de vapor, tipo de suporte do equipamento dentro da caldeira, uso de superfícies aletadas na zona de convecção, etc. A figura 19 mostra detalhe de um superaquecedor de radiação.

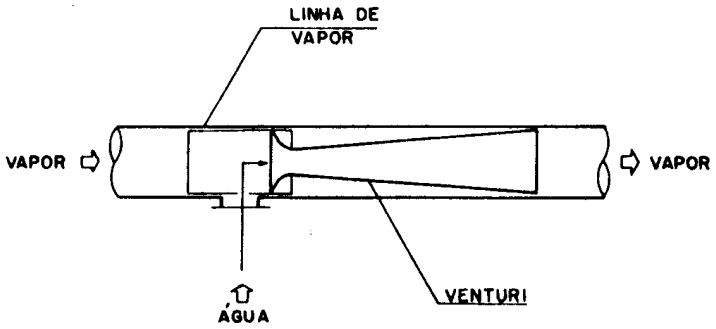

Figura 18 - Esquema construtivo de dessuperaquecedor.

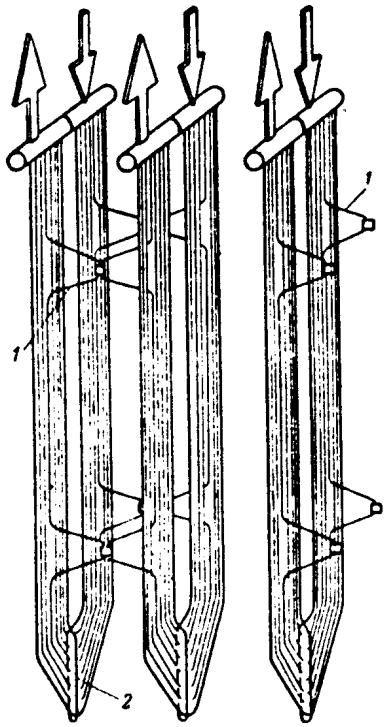

Figura 19 - Painéis radiantes pendentes de superaquecedor.

4.2 - Economizadores

Os economizadores se destinam a aquecer a água de alimentação antes de ser introduzida no interior da caldeira. O pré aquecimento é feito através da troca de calor com os gases de combustão saindo da caldeira.

O aproveitamento do calor sensível dos gases de combustão traz um aumento de eficiência térmica do equipamento. Economizadores são trocadores de calor gás-líquido. Devido ao baixo coeficiente de troca de calor por convecção no lado dos gases, geralmente os economizadores são compostos por tubos aletados. Em relação á sua instalação, devem estar localizados após a última superfície de convecção do gerador de vapor. Podem ser fabricados integralmente à caldeira, ou podem ser adicionados na parte exterior da mesma, logo após a saída dos gases (figuras 20 e 21).

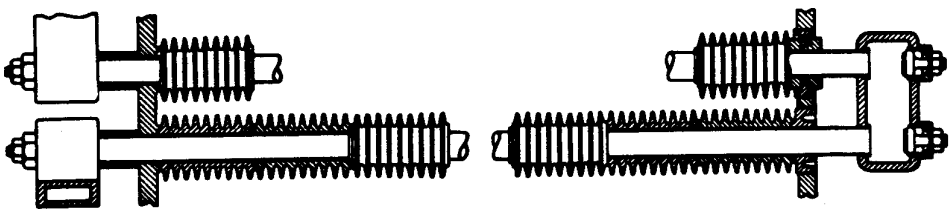

Figura 20 - Elementos de economizadores de tubos aletados.

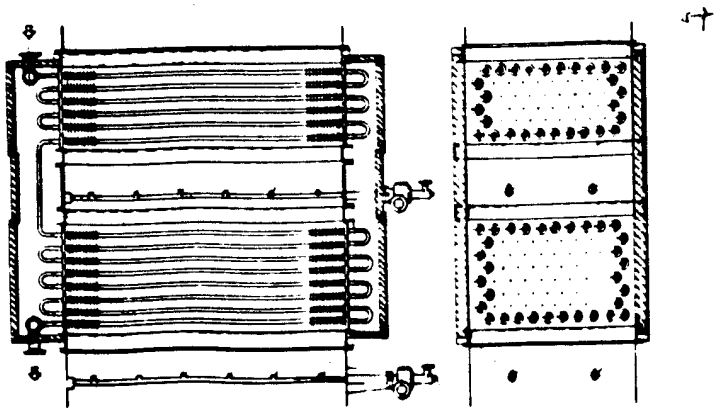

Figura 21 - Economizador de tubos aletados.

Economizadores são praticamente usados em médias e grandes instalações. O custo adicional comparado com o ganho de rendimento térmico não viabiliza a utilização em pequenas caldeiras, e que geralmente se utilizam de alimentação intermitente de água, impossibilitando, portanto, a operação em uso contínuo e simultâneo dos fluxos de água e produtos de combustão.

4.3 - Pré-aquecedores

Os pré-aquecedores de ar elevam a temperatura do ar de combustão antes de sua entrada nos queimadores ou fornalha, através da troca de calor com os produtos de combustão saindo da caldeira. Além da vantagem de aumento de rendimento térmico por diminuição das perdas nos gases de exaustão, o ar pré-aquecido melhora o funcionamento e rendimento dos queimadores ou da fornalha. Ar pré-aquecido aumenta a estabilidade de chama, a temperatura interna da câmara de combustão, aumentando portanto a troca de calor por radiação, permitindo a utilização de menor excesso de ar. O fato de se utilizar também o calor sensível dos gases de combustão não impede seu uso conjunto com o economizador, o qual quando usado , deve vir antes do pré-aquecedor, já que existem limitações quanto a temperatura máxima do ar de combustão conforme o tipo de queimador e combustível utilizado.

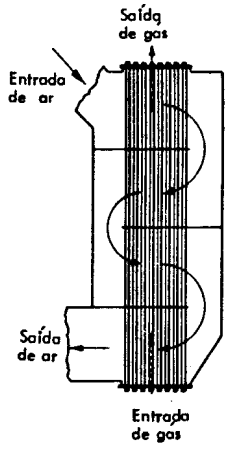

Figura 22 - Pré-aquecedor de ar, tubular vertical.

Pré-aquecedores de ar são trocadores de calor gás-gás, e os tipos mais utilizados são:

- tubulares, (figura 22)
- regenerativos rotativos (figura 23)e
- de placas.

Não é vantajoso a utilização de tubos aletados em pré-aquecedores de ar, pois os coeficientes de película são da mesma ordem de grandeza para os dois lados: ar e gases de combustão. Para o devido aproveitamento de aletas, esta deveriam estar montadas nos dois lados do

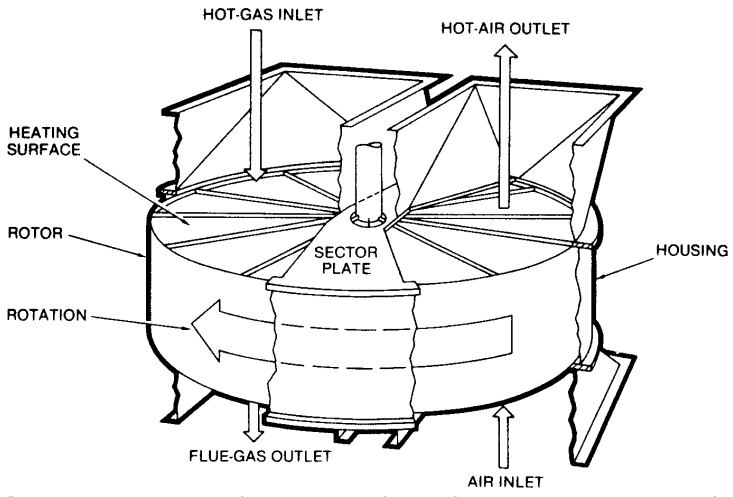

Figura 23 - Pré-aquecedor de ar regenerativo rotativo.

fluxo, o que dificulta sua aplicação em tubos de secção circular. Alguns trocadores de placas retas possuem aletas em ambos os lados, quando são construídos em unidades modulares.

Os pré-aquecedores de ar regenerativos rotativos se utilizam do armazenamento de calor sensível em elementos vazados de um rotor rotativo, o qual girando a baixa rotação (2 a 4 rpm), alternam cada elemento em contacto com os gases quentes saindo da caldeira e o ar frio sendo aquecido. Sempre existe uma pequena mistura de ar e gases de combustão, já que é difícil efetuar-se uma construção perfeitamente estanque entre as correntes de fluxo que atravessam o rotor. Devido a sua complexidade construtiva, tais pré-aquecedores sómente são viáveis em grandes unidades de geração de vapor.